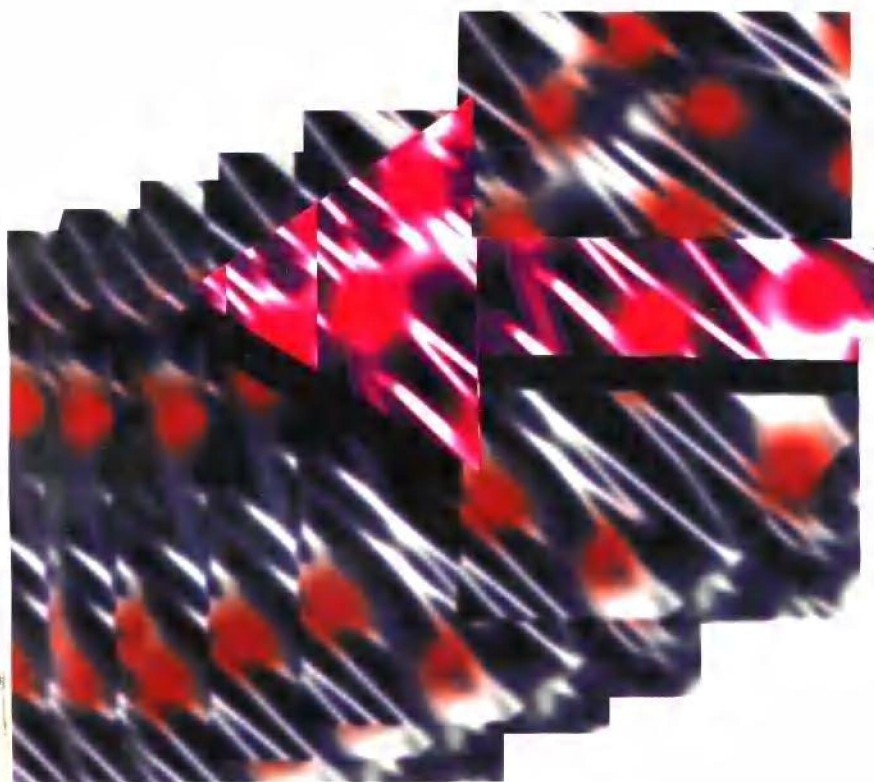


# 生物传热学

刘 静 王存诚 编著



科学出版社

# 生物传热学

刘 静 王存诚 编著

科学出版社

1997

## 内 容 简 介

本书系统阐述生物医学工程领域中的最新学科之一——生物传热学的研究意义、学科内容,以及如何应用热科学手段剖析生物活体组织内部传热问题的基本思想和方法,并归纳出了前沿领域中若干可供探索的途径和方向,对生物热医学工程的应用也作了必要的介绍。本书可供生物医学工程、热科学、医学、医疗仪器、生物信息与控制等领域内的研究人员、工程师以及大专院校有关专业师生、研究生阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

生物传热学/刘 静,王存诚编著. —北京:科学出版社,1997.5  
ISBN 7-03-005874-7

I. 生… I. ①刘… ②王… II. 生物物理学:传热学 IV. Q613

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 02604 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1997年9月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1997年9月第一次印刷 印张:14 1/8

印数:1—1 200

字数:365 000

定价: 30.00 元

# 前 言

生物传热学是生物医学工程领域内交叉于生物、热物理、临床医学等诸多领域的最新的学科分支之一,其核心在于探索生命最基本的特征之一——物质和能量的传输规律并加以有效应用,其内容在临床医学工程领域中具有极其重要的理论意义和应用价值,业已成为当今学术界竞相关注的前沿。生物传热学的学科前景在于通过热科学的理论探讨、数值模拟和实验研究达到:为日益增长的激光手术、肿瘤高温治疗和光动力学疗法、低温外科、移植器官冷冻储存、疾病热诊断技术、烧伤、冻伤、烫伤等临床医学和康复医学的发展提供相应依据,为热生理机制的探索、动物恒温机制的揭示、动物冬眠问题的研究包括热舒适、热感觉等复杂的生理、心理问题的解决增加科学储备,为各种热理疗仪、热诊断仪、热保健器械的开发奠定理论基础。生物传热学研究涉及到:生物组织细微解剖结构与生物传热传质关系的研究、各类生物体非均匀热生理参数(热物性)的在体测试、生物体空间温度场的无损重构、热科学技术应用于临床实践以及各种热生理机制的热学解释等问题。所有这些内容和目标必将极大地丰富和发展工程热物理学科的理论体系,也将给生命热科学、临床医学工程等带来若干全新的命题和概念,并提供相应的研究手段,任何突破和创新都会带动相关领域的前进。

面对日益兴起的热医学工程应用,关于活体生物组织中传热传质问题的相关理论与技术的研究和实施早已引起世界各国的高度重视。我国在该领域内的研究工作起步较晚,至今极少出版系统阐述生物传热学相关理论与方法的书籍。国际上全面介绍生物传热学各个侧面的著作也不多见,所以撰写一本相应的引论性的著作可以起到抛砖引玉之效,继而推动这一学科领域的发展并促

进相应临床热科学技术的进步。本书是在收集大量国际上最新的一些重要研究资料的基础上编著而成的,其中也包括国内一些学者及我们自己的研究成果。由于生物传热学科领域跨度大、内容新,文献散见于不同的专业期刊、著作和会议论文集,不少内容发展至今应该说尚不很成熟,因而系统阐述这一学科领域的理论体系无疑是个困难,所以本书的编著只能算是这一方面的一个尝试。我们期待本书的出版能对我国医疗技术的现代化和促进生物传热学在国内的迅速发展起到一定的推动作用。

本书旨在介绍活体生物传热中的一些基本理论、概念和方法,以使读者了解如何应用热科学手段深入剖析生命系统中的传热传质问题,并利用已掌握的工程知识分析和解释生命热现象,以便将其更充分地应用于医疗实践。关于特殊条件下如低温生物医学方面的一些相关理论与方法,感兴趣的读者可参阅《低温生物医学技术》(华泽钊,任禾盛著,科学出版社,1993)、《低温医学》(刘金刚,刘作斌主编,人民卫生出版社,1993)及《实用低温医学》(章崧英,王泽时,郑斯涌主编,科学出版社,1994)等内容相当丰富的著作,本书在此不拟涉及这些内容。全书结构安排如下:第一章全面总结和介绍了生物传热学的研究内容、特点和方法,深入归纳和提炼出了若干重要研究课题,指出了相应的可供探索的途径和新方向,不同领域如生物、热物理、临床医学、医学工程等专业的读者在这里均可找到各自感兴趣的内容,并能由此深入钻研下去;针对生物传热学开展相对较多的内容,本章还特别就当前生物传热学模型的一些建构方法和生物热物性测试技术的优缺点进行了综合评述;第二章阐述的内容是一些开展生物传热学研究所必备的背景知识。即简单介绍了传导、对流、辐射及蒸发散热等几类传热问题的基本概念;第三章是生物传热学的重要辅助内容,介绍了经典热力学和非平衡热力学的基本概念及其在生命科学中的应用情况,并着重从热物理的角度探讨了人体基础代谢的有关问题,这一努力对全面理解生物传热本质以及对生物热力学将来的进一步拓展富有启发意义,是连接生物传热学和热力学的一个桥梁;第四章从

生物学的角度全面介绍了热物理因子的生物学效应,对将热科学技术拓展应用于生命科学直接起到借鉴作用;第五章列举了若干典型的生物传热模型的建模思想,读者可由此获取研究生物体特殊结构传热问题的基本经验;第六章介绍了单(双)根血管内流动血液及其与周围组织间的传热问题,这是开展更为复杂的血管传热研究的基础;第七章将从生物组织细微解剖结构的角度全面介绍由 Weinbaum、Jiji 及其同事建立起来的生物传热模型的基本内容,这些工作对于建立更为深入细致而完善的且考虑了血管结构的生物传热模型具有重要的参考价值;第八章着重研究了一类重要的热生理现象——活体组织温度振荡效应的热物理机制,介绍了相应的生物传热学理论及实验研究结果,这是热科学理论在揭示生命热现象上的成功应用;第九章介绍了几类数值方法在生物体温度场预示问题上的应用,包括有限差分法、有限元法等;第十章重点阐述边界元方法在无损重构生物体内随空间和时间变化的温度场、血液灌注率场和代谢率场问题上的重要应用;第十一章介绍了几类典型的活体生物组织热物性测试方法的设计思想和技术路线,其内容具有重要的应用前景;第十二章介绍了利用热技术实现疾病热诊断的方法和概念,有助于医学与生物传热学的相互渗透,文中还介绍了无损获取生物热信息的几类方法,它们可为发展适宜于临床应用的温度场监测手段提供理论基础;第十三章从热科学的角度对几类生物热现象的物理机制进行了定量分析,并阐述了将新近逐步得到认识的活体组织内的热波效应应用于医学实践的工程途径,解释了该效应的一些医学生理学意义;附录中还收集列举了若干有重要参考价值的生物热物性数据。

本书除第三章由第二作者编写外,其余各章的编写和全书的统稿由第一作者完成。

应该指出,生物传热学本身是一门极其广博而丰富的学科,要在一本著作中穷尽其每一范畴是不太现实的事。由于编著者曾进行了数年的生物传热学研究工作,因而本书的取材和选题实际上也反映了编著者所思考的问题和探索的方向,甚至是兴趣所在,

至于相关的其它内容,相信读者能从中获得启发,继而获取更多的信息。但可以说,本书内容基本反映了当前生物传热学的研究现状及其进展情况。同时,编著者希望通过本书能向读者传达这样一个事实,即生物传热学是一门新兴的活的不断变化着的科学,它正在根据一些新的发现和认识使其基本命题和定理不断趋于完善,并由此而提出新的概念。所以与其说本书介绍的是生物传热学的一些基本问题及其研究成果,不如说本书提供得更多的是一种方法和研究思路,而这些方法和思路对于开拓和从事这门学科的研究和应用无疑是有积极意义的。若读者能从中获得启发并因此而有所收获的话,我们将深感欣慰。

本书的写成直接得益于国内外众多学者在此领域内的卓有成效的工作,谨在此向我们所直接或间接引用过的作者表示衷心的感谢;本书第一作者在编著过程中得到了清华大学焦树建教授、中国科学院工程热物理研究所蔡睿贤院士的鼓励和指点,谨在此表示衷心的感谢;第一作者还要衷心感谢清华大学任泽霖教授和王存诚教授在其博士论文研究工作中所给予的热情指导和帮助;清华大学张学学副教授的热情相助及中科院卢文强教授的帮助和鼓励,作者在此也谨表谢意;作者还希望在此向为本书的出版付出辛勤劳动的编辑表示衷心的感谢;最后,作者特别感谢国家自然科学基金委员会所给予的研究经费资助。

限于编著者水平,加之成稿仓促,本书不足甚至错误之处,恳请读者批评指正。

刘 静 王存诚

1996年9月于清华园

# 目 录

## 前言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第一章 概论                         | 1  |
| § 1.1 导言                       | 1  |
| § 1.2 当前生物传热学的若干重要研究方向和课题      | 1  |
| 1.2.1 生物传热学的学科背景               | 1  |
| 1.2.2 生物传热特点                   | 2  |
| 1.2.3 血管传热研究概况与课题              | 3  |
| 1.2.4 温度场无损重构课题                | 4  |
| 1.2.5 生物传热模型的建构                | 5  |
| 1.2.6 生物热物性参数的测定               | 5  |
| 1.2.7 生命热现象的研究                 | 6  |
| 1.2.8 人体一些特殊结构的传热问题            | 7  |
| 1.2.9 各类热物理因子的医疗应用研究           | 7  |
| 1.2.10 用热物理手段诊断疾病的研究           | 8  |
| § 1.3 生物传热学模型的发展回顾及其评述         | 9  |
| § 1.4 生物热物性测试技术的回顾及各方法优缺点的综合评述 | 12 |
| 1.4.1 测定离体生物组织热导率的平板法          | 14 |
| 1.4.2 活体有损伤测量方法                | 15 |
| 1.4.3 活体无损测量方法                 | 21 |
| § 1.5 生物传热学研究的一些新进展            | 23 |
| § 1.6 总结与展望                    | 27 |
| 第二章 生物传热学的背景知识                 | 30 |
| § 2.1 导言                       | 30 |



|            |                           |           |
|------------|---------------------------|-----------|
| § 2.2      | 生物传热学的导热基本定律及其定解问题·····   | 32        |
| · § 2.3    | 人体与环境之间的对流热交换·····        | 36        |
| § 2.4      | 人体与环境之间的辐射热交换·····        | 40        |
| · § 2.5    | 人体通过呼吸造成的蒸发热散失·····       | 45        |
| § 2.6      | 生物传热中的相变问题·····           | 47        |
| 2.6.1      | 稳态问题·····                 | 47        |
| 2.6.2      | 瞬态问题·····                 | 49        |
| <b>第三章</b> | <b>生物传热问题的热力学背景</b> ····· | <b>51</b> |
| § 3.1      | 导言·····                   | 51        |
| § 3.2      | 经典热力学·····                | 53        |
| 3.2.1      | 热力学第一定律与内能·····           | 53        |
| 3.2.2      | 热力学第二定律与熵·····            | 56        |
| 3.2.3      | Gibbs 自由能与焓 ·····         | 57        |
| 3.2.4      | 动物的呼吸作用·····              | 58        |
| 3.2.5      | 植物的光合作用·····              | 60        |
| § 3.3      | 非平衡体系热力学·····             | 61        |
| 3.3.1      | 熵产生与自由能耗散·····            | 61        |
| 3.3.2      | 耦合过程的效率·····              | 64        |
| 3.3.3      | 个体发育生物学的热力学研究·····        | 66        |
| 3.3.4      | 生物结构的演化——自组织·····         | 68        |
| 3.3.5      | 生态系统的稳定性·····             | 70        |
| § 3.4      | 人体基础代谢的热物理问题·····         | 73        |
| 3.4.1      | 基础代谢的热力学意义——人体热模型问题·····  | 74        |
| 3.4.2      | 人体基础代谢率的异速生长规律·····       | 78        |
| <b>第四章</b> | <b>热物理因子的生物效应</b> ·····   | <b>89</b> |
| § 4.1      | 导言·····                   | 89        |
| · § 4.2    | 生物体的电磁学性质及其热体现·····       | 90        |

|            |                                           |            |
|------------|-------------------------------------------|------------|
| 4.2.1      | 电场热效应                                     | 90         |
| 4.2.2      | 射频电场的热作用                                  | 91         |
| 4.2.3      | 磁场热效应                                     | 92         |
| 4.2.4      | 微波热效应                                     | 93         |
| § 4.3      | 机体对高低温的反应                                 | 94         |
| § 4.4      | 高、低温的致病现象                                 | 96         |
| § 4.5      | 高、低温的医疗作用                                 | 97         |
| § 4.6      | 高、低温对细胞的致死效应                              | 98         |
| § 4.7      | 低体温脑复苏                                    | 99         |
| <b>第五章</b> | <b>生物传热问题的基本模型</b>                        | <b>102</b> |
| § 5.1      | 导言                                        | 102        |
| § 5.2      | 生物组织传热的集中参数模型                             | 103        |
| § 5.3      | 灌流组织的 Pennes 类生物传热模型                      | 106        |
| § 5.4      | 生物传热的多孔体模型                                | 108        |
| § 5.5      | 考虑灌流组织内血管统计结构的生物传热模型                      | 112        |
| § 5.6      | 人体呼吸道内传热传质问题的理论模型                         | 117        |
| § 5.7      | 毛发覆盖的皮肤表面的传热模型                            | 123        |
| <b>第六章</b> | <b>单(双)根血管与周围组织间的传热</b>                   | <b>130</b> |
| § 6.1      | 导言                                        | 130        |
| § 6.2      | 血管中流动血液的传热                                | 131        |
| § 6.3      | 平行血管间的传热                                  | 136        |
| § 6.4      | 皮肤表面附近血管的传热                               | 140        |
| <b>第七章</b> | <b>基于组织解剖结构的生物传热学模型研究</b>                 | <b>144</b> |
| § 7.1      | 导言                                        | 144        |
| § 7.2      | 基于生物组织细微解剖结构的 Weinbaum-Jiji 生物<br>传热方程的建立 | 144        |
| 7.2.1      | 解剖学基础                                     | 144        |

|            |                                     |            |
|------------|-------------------------------------|------------|
| 7.2.2      | W-J 方程的建立和求解 .....                  | 150        |
| § 7.3      | W-J 方程中微组织结构变化及生理参数对传热影响情况的研究 ..... | 163        |
| § 7.4      | 简化型的 W-J 生物传热方程 .....               | 168        |
| § 7.5      | W-J 方程的讨论 .....                     | 176        |
| § 7.6      | 利用 W-J 模型建立表面组织传热过程的理论模型 .....      | 188        |
| § 7.7      | 人体整肢前臂上的宏微观混合型生物传热模型 ...            | 194        |
| § 7.8      | 普通情况和热疗状况下 W-J 方程的应用研究 .....        | 203        |
| <b>第八章</b> | <b>生物活体组织温度振荡机制的研究 .....</b>        | <b>209</b> |
| § 8.1      | 导言 .....                            | 209        |
| § 8.2      | 生物活体组织中的温度振荡现象 .....                | 210        |
| § 8.3      | 活体组织生物传热问题的热波模型 .....               | 211        |
| § 8.4      | 生物传热波动导热方程的求解、振荡准则的获得及讨论 .....      | 214        |
| § 8.5      | 生物活体组织温度振荡行为的动力稳定性分析 ...            | 223        |
| § 8.6      | 活体组织温度振荡效应物理过程的细节探微 .....           | 226        |
| § 8.7      | 活体组织温度振荡理论的仿真实验证据 .....             | 231        |
| § 8.8      | 活体动物实验证据 .....                      | 241        |
| § 8.9      | 完整刻划活体组织温度振荡效应的两个生物传热模型注记 .....     | 248        |
| § 8.10     | 广义时间迟滞型生物传热方程及其波特性的初步分析 .....       | 249        |
| § 8.11     | 结论与展望 .....                         | 255        |
| <b>第九章</b> | <b>生物传热问题中的数值方法 .....</b>           | <b>259</b> |
| § 9.1      | 导言 .....                            | 259        |
| § 9.2      | 有限差分法 .....                         | 260        |
| § 9.3      | 有限元格式 .....                         | 264        |

|             |                                                           |            |
|-------------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 9.3.1       | 控制方程 .....                                                | 264        |
| 9.3.2       | 边界条件 .....                                                | 265        |
| 9.3.3       | 瞬态模型 .....                                                | 266        |
| 9.3.4       | 二维稳态模型 .....                                              | 266        |
| § 9.4       | 近似有限元法 .....                                              | 267        |
| <b>第十章</b>  | <b>求解复杂形状生物传热正反问题的边界元方法.....</b>                          | <b>269</b> |
| § 10.1      | 导言.....                                                   | 269        |
| § 10.2      | 求解二维复杂形状生物传热正问题的边界元技术<br>.....                            | 271        |
| 10.2.1      | 数学描述.....                                                 | 271        |
| 10.2.2      | 边界积分方程的离散化与求解方法.....                                      | 274        |
| § 10.3      | 二维复杂形状生物传热问题中同时无损重构内热<br>源场和温度场的边界元技术及其数值方法研究...<br>..... | 277        |
| § 10.4      | 一些复杂问题的处理方法注记.....                                        | 284        |
| 10.4.1      | 三维边界元技术的相关措施.....                                         | 284        |
| 10.4.2      | 非线性热导率生物传热问题的处理方法.....                                    | 284        |
| § 10.5      | 无损重构生物体内部温度场的简化边界元途径...<br>.....                          | 285        |
| 10.5.1      | 生物体表热流通量的简便确定方法.....                                      | 285        |
| 10.5.2      | 应用实例.....                                                 | 288        |
| <b>第十一章</b> | <b>活体生物热物性测试技术.....</b>                                   | <b>291</b> |
| § 11.1      | 导言.....                                                   | 291        |
| § 11.2      | 测试活体生物组织热物性的等温加热法.....                                    | 291        |
| § 11.3      | 测试生物热物性的等热流方波加热法.....                                     | 299        |
| § 11.4      | 热脉冲衰减技术的误差分析.....                                         | 303        |
| § 11.5      | 活体生物组织有效热导率的测取.....                                       | 308        |
| § 11.6      | 考虑探针尺寸的热脉冲衰减技术.....                                       | 311        |

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| § 11.7 生物体非均匀热物性的全参数活体在线辨识方法<br>(TITP 法) .....                   | 313 |
| 11.7.1 生物医学传热研究中的物性测试和建模问题<br>概论 .....                           | 313 |
| 11.7.2 基于生物体内多点温度瞬态响应的物性全参<br>数辨识技术 .....                        | 314 |
| 11.7.3 全参数辨识技术的应用实例及讨论 .....                                     | 318 |
| 11.7.4 全参数辨识技术在测量温度依赖型的生物体<br>热导率、热扩散率、血液灌注率和代谢率问题<br>上的应用 ..... | 319 |
| 11.7.5 TITP 法的一个原理性实验研究 —— 切片试<br>验 .....                        | 322 |
| 11.7.6 TITP 法的简化变形 .....                                         | 327 |
| 11.7.7 TITP 法的稳定求解措施 —— 正则化方法 ..<br>.....                        | 328 |
| <b>第十二章 生物医学热信息的无损检测</b> .....                                   | 334 |
| § 12.1 导言 .....                                                  | 334 |
| § 12.2 生物医学临床无损诊断疾病的热成像方法 .....                                  | 334 |
| 12.2.1 热成像医学诊断的物理基础 .....                                        | 334 |
| 12.2.2 热成像医学诊断的临床应用领域 .....                                      | 336 |
| 12.2.3 对热成像诊断医学发展展望 .....                                        | 338 |
| § 12.3 生物体皮下温度的无损检测技术研究 .....                                    | 339 |
| 12.3.1 常热物性时的近似体核温度表达式 .....                                     | 339 |
| 12.3.2 变热物性情况下生物体皮下温度的近似变分<br>解 .....                            | 341 |
| § 12.4 一种可同时测取非均匀血液灌注率和代谢率的稳<br>态方法 .....                        | 344 |
| 12.4.1 简化生物传热方程形式及代谢率 $Q_m$ 与血液<br>灌注率 $W_b$ 的关联 .....           | 344 |

|             |                                    |            |
|-------------|------------------------------------|------------|
| 12.4.2      | 非均匀参数 $W_b(x), Q_m(x)$ 的测取方法和结果    | 345        |
| § 12.5      | 完全无创伤性获取生物体非均匀热导率和血液灌注率的脉冲谱技术(PST) | 348        |
| 12.5.1      | 概论                                 | 348        |
| 12.5.2      | 求解生物传热反问题的 PST 方法介绍                | 350        |
| 12.5.3      | PST 法用于重构生物体变热物性的简化处理              | 355        |
| 12.5.4      | 实验方法、计算实例及讨论                       | 357        |
| <b>第十三章</b> | <b>有关热医学问题的物理分析</b>                | <b>361</b> |
| § 13.1      | 导言                                 | 361        |
| § 13.2      | 生物组织受热致伤过程的物理分析                    | 361        |
| 13.2.1      | 生物组织热损伤过程的三阶段模式                    | 361        |
| 13.2.2      | 小空穴形成的热弹性力学机制                      | 363        |
| 13.2.3      | 蒸汽团的形成与生长机制                        | 367        |
| § 13.3      | 皮肤浅层一个反常温度分布现象的物理解释                | 370        |
| 13.3.1      | 问题的由来                              | 370        |
| 13.3.2      | 考虑汗液传热的皮肤三层模型                      | 370        |
| 13.3.3      | 分析与结论                              | 373        |
| § 13.4      | 活体生物组织中热波效应的医学应用探讨                 | 376        |
| 13.4.1      | 活体组织内热量传播的有限速度特性                   | 377        |
| 13.4.2      | 活体组织内温度振荡效应的生理学意义                  | 378        |
| 13.4.3      | 利用温度振荡曲线实现对活体组织内血液灌注状况的监测          | 378        |
| 13.4.4      | 利用热波反射、衰减图像对肿瘤和病变组织实现动态无损检测        | 379        |
| 13.4.5      | 冷、热疗中保护正常组织的预热、预冷处理措施              | 381        |
| 13.4.6      | 肿瘤热疗、低温脑复苏过程中控制血流的医                |            |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 学意义·····                              | 383 |
| 13.4.7 肿瘤热疗中加热频率的优选·····              | 384 |
| 13.4.8 结论·····                        | 385 |
| § 13.5 生物组织中几类热波传播特性的研究·····          | 385 |
| 13.5.1 一维情况下的热波传播·····                | 386 |
| 13.5.2 生物组织中空间热波的传播特性·····            | 398 |
| 13.5.3 小结·····                        | 410 |
| § 13.6 无损测取活体组织血液灌注率的热波相位移原理<br>····· | 411 |
| 13.6.1 简谐加热作用下生物体内的温度分布特性<br>·····    | 411 |
| 13.6.2 无损测取活体组织血液灌注率的热波相位移<br>原理····· | 415 |
| 13.6.3 小结·····                        | 417 |
| 附录 有关生物热物性数据·····                     | 418 |
| 参考文献·····                             | 422 |

\* 国家自然科学基金(批准号:59606013)资助项目。

# 第一章 概 论

## § 1.1 导 言

近年来,随着人体环境学的发展尤其是生物医学工程领域中诸如低温外科手术、移植器官冷冻储存<sup>[1]</sup>、肿瘤加热疗法<sup>[2-4]</sup>、低温脑复苏康复措施<sup>[5,6]</sup>、疾病热诊断技术<sup>[7-11]</sup>、烧伤、冻伤、烫伤等临床医学和康复医学的进步,加之工程热物理学的横向发展,要求人们对人体生物传热现象的研究逐渐从定性过渡到定量,其结果直接刺激了人类深入认识人体传热特性、传热机制的迫切性。有鉴于此,国际上正在酝酿和形成一门新兴的交叉学科——生物传热学<sup>[12,13]</sup>。临床热科学因其在上述领域中显示出的越来越巨大的医用价值,展示了其作为一门学科而开展深入研究的重要理论意义和应用价值。本章内容将全面归纳和概述生物传热学在现代生物医学工程领域和相关领域内的研究意义、现状及其自身的研究特点,重点介绍当前生物传热领域内的几个重要研究方向和课题,指出和阐明其中尚待解决的问题以及可能的应用前景,并对现存生物传热学模型的建构方法和生物热物性测试技术的优缺点进行综合评述。

## § 1.2 当前生物传热学的若干重要研究方向和课题

### 1.2.1 生物传热学的学科背景

定量化研究是生物科学技术进步的重要标志。工程热物理方法与技术的引入,使得生命热现象、热问题的解决取得了长足进展,许多过去从生理学角度看来至为复杂的热问题一经引入热科



学的有关概念后,往往可以获得非常清晰而明确的认识。热技术在现代医疗中日新月异的应用也为医学科学的进步注入了新鲜的血液。热科学方法从其一开始在一些生物医学工程问题上得心应手的应用和所处的独特地位,就早已引起世界各国的高度重视,被认为是临床医学中的关键技术。生物传热学研究的内容涉及到从细胞、亚细胞层次到组织、器官直至整个生物个体内的热质传输现象。其主要方向包括:对各种生命层次上热参数的测取并建立相应的测试仪器;对在传热、传质过程中具有重要意义的物性测定;对人体器官、系统的正常和异常热生理过程的解释和阐明,并应用复杂而精确的数学模型对其进行的描述;对各种热物理因子作用于人体及各种生物材料时而产生的热学效应的研究;热物理学应用于医疗实践等。生物传热学的研究成果可广泛应用于日益增长的低温外科、激光手术、移植器官冷冻储存、肿瘤高温治疗、低温脑复苏康复措施、疾病热诊断技术、人类居住环境的热调节和生活质量的改善,以及烧伤、冻伤、烫伤等临床医学和康复医学之中。生物传热学所涉及的领域有:生物学、生理学、解剖学、传热传质学、非平衡热力学、有关工程分支学科、计算机科学和临床医学等,其理论与技术的任何突破都会促进上述相关领域的发展。它已成为横跨诸多领域的最新的学科生长点之一,是当今学术界竞相关注的前沿。

### 1.2.2 生物传热特点

生物组织内传热、传质以及生物体与环境之间物质和能量的交换过程,是生命系统最基本的过程之一。作为物质进化的最高形式,生物组织不同于传统研究中的一般工程材料,从局部看,其结构异常复杂,很难看成各向同性、均匀的介质,特别是其独特的血液和体液循环更增进了传热过程的复杂性,这一既有热量传递、又有质量传递的特点与一般工程材料中热量唯一地通过导热传递的特点极不相同。要确定由于生理原因,特别是血液灌流所引起的能量传递非常困难,因为这明显地较其它系统的热量传递